

Block Notes Matematico

Teoria delle Stringhe e delle Brane

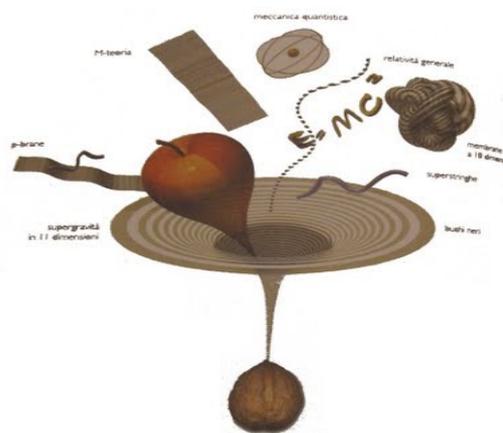
ing. Rosario Turco¹, prof. Maria Colonnese



Prima di Einstein nessun fisico si era posto il problema, eppure la teoria della relatività e la teoria quantistica aprono la porta a mondi multidimensionali e multiversi, con dimensioni extra. Il principio di indeterminazione di Heisenberg permette al vuoto quantomeccanico risultati incredibilmente contro-intuitivi.

Una rivoluzione concettuale paragonabile solo con la relatività e con la funzione densità dell'elettrone nell'equazione di Schrodinger, non tanto digerita dai fisici all'inizio del secolo.

I risultati degli ultimi quindici anni portano alla estensione del Modello standard delle particelle e a teorie che tentano di unificare la gravità con le forze elettromagnetiche, le forze nucleari deboli e le forze nucleari forti. Da questo tentativo sono nate la TOE, la teoria del tutto, la teoria delle stringhe, il concetto di brane e in ultimo la M-teoria.



Il lavoro presente è un approfondimento sul tema della Teoria della Stringhe e delle Brane, guidando il lettore in una miriade di concetti e novità.

mailto:rosario_turco@virgilio.it



¹ Rosario Turco è un ingegnere elettronico presso Telecom Italia (Napoli) ed ideatore di "Block Notes Matematico" insieme alla prof. Maria Colonnese del Liceo Classico "De Bottis" di Torre del Greco, provincia di Napoli

INDICE

.....	
La teoria delle stringhe	3
Teoria delle stringhe applicata alle brane.....	6
Particelle, stringhe e brane	9
La gravità.....	10
Modelli di mondi di brane	10
L'isolamento delle particelle	11
Particelle di Kaluza-Klein (KK).....	11
La scala di dimensioni	12
Grandi dimensioni extra e la gravità: la teoria ADD.....	12
Soluzione al problema della gerarchia	13
Geometrie Curve	13
Conclusioni.....	14
<i>Riferimenti</i>	14

FIGURE

Figura 1 – Le stringhe chiuse e le loro oscillazioni.....	3
Figura 2 – Spazio di Calabi-Yau a dieci dimensioni.....	4
Figura 3 – Spazio di Calabi-Yau a sei dimensioni	4
Figura 4 – Edward Witten	5
Figura 5 – Rotazioni varie dell'immagine precedente	5
Figura 6 – Le sei dimensioni extra	5
Figura 7 – Schema unificato delle cinque teorie	8
Figura 8 – Due brane parallele con 5 stringhe.....	11

TABELLE

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle teorie di stringhe conosciute.....	7
---	---

La teoria delle stringhe

Abbiamo visto che le stringhe *sono segmenti di energia, simili a corde vibranti*, e monodimensionali. Una particella del Modello standard è dovuta alla vibrazione di una stringa e le caratteristiche di vibrazione determinano le caratteristiche della particella.

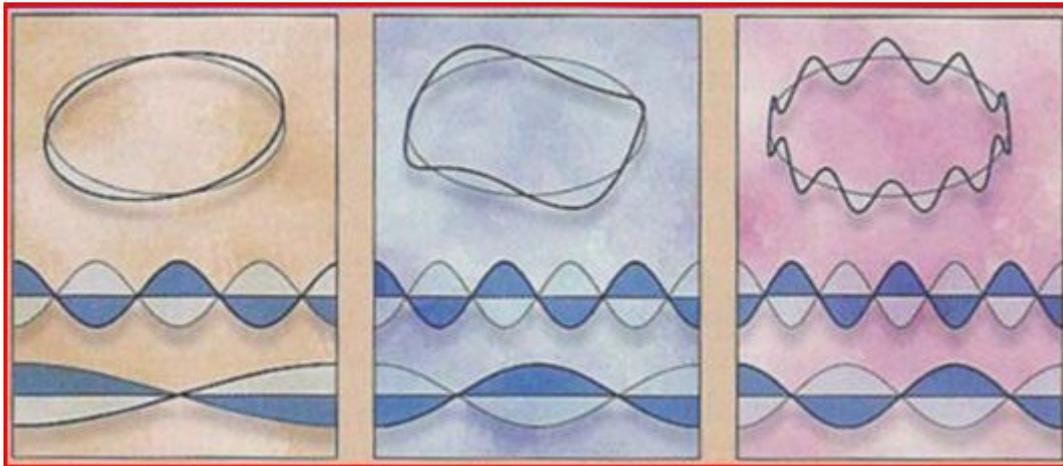


Figura 1 – Le stringhe chiuse e le loro oscillazioni

Le stringhe si estendono in una sola dimensione, sono monodimensionali e si spostano nel tempo; possono essere *aperte* come un laccio o *chiuse* con le estremità come un cappio.

I loro modi di vibrazione corrispondono ad un numero intero di oscillazioni, su e giù, lungo tutta la estensione della stringa. Nel caso di stringhe aperte le oscillazioni vanno da un capo all'altro e invertono, poi, la direzione con un movimento avanti-indietro; mentre nel caso di stringhe chiuse l'oscillazione su e giù continua in circolo sempre nella stessa direzione.

La modalità di vibrazione determinano: massa, carica e spin. Ci saranno, quindi, molte particelle imparentate come carica e spin, ma con massa diversa. In particolare variando la frequenza delle oscillazioni, dalla frequenza fondamentale alle armoniche superiori, si può passare dalle particelle leggere a quelle pesanti. Poiché le stringhe si possono fare oscillare a frequenze molto elevate, significa anche che a energia molto elevate (non raggiungibili oggi) esistono particelle molto pesanti.

La teoria delle stringhe fu inizialmente introdotta per gli adroni ma portava a conseguenze errate, tipo la previsione del *tachione*. Il tachione (dal greco *tachys* = veloce) è una particella più veloce della luce, difatti inesistente. Se appare nei calcoli significa che il modello pensato è instabile, sicuramente esiste un modello stabile ad energie inferiori dove non esiste il tachione.

Un miglioramento alla teoria fu fatto da *Ramond, Neveu e Schwartz* che introdussero la versione supersimmetrica delle stringhe: le *superstringhe*. Si notò che questa volta applicata alla gravità quantistica poteva dare delle novità:

- non apparivano i tachioni
- si potevano trattare anche particelle con spin $\frac{1}{2}$ come i fermioni
- lo spin 2 poteva giustificare il gravitone
- si potevano trattare particelle come i bosoni di gauge
- si potevano trattare situazioni multi-dimensionali

L'ultimo punto era interessante. Come un oggetto puntiforme può muoversi in 4 dimensioni (3 spaziali e 1 temporale), le stringhe, che rispetto al punto hanno una dimensione in più, possono muoversi su molte più dimensioni. Ebbene è stato dimostrato che la teoria delle superstringhe ha senso almeno su 10 dimensioni (9 spaziali ed 1 temporale). In realtà esistono varie versioni di teoria che differiscono nel numero di dimensioni.

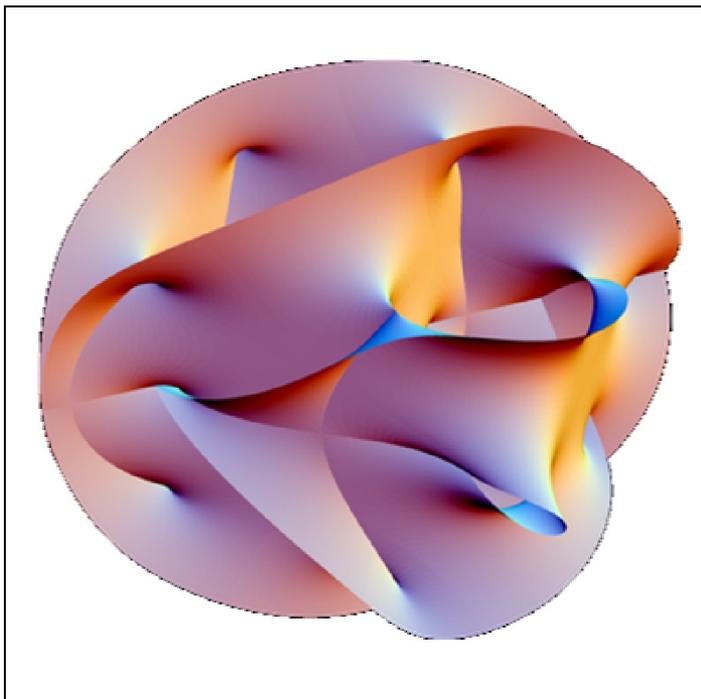


Figura 2 – Spazio di Calabi-Yau a dieci dimensioni

La figura 2 accanto mostra come apparirebbe uno spazio di Calabi-Yau a dieci dimensioni.

La figura 3 dà un'idea di questi spazi: sono però immagini che sintetizzano su un piano bidimensionale (il piano del foglio) le 6 dimensioni.

La figura 4 deriva da modelli ridotti tridimensionali, "fotografati in rotazione", come nella figura 3.

Grosso interesse nacque sulla teoria delle superstringhe nel momento in cui *Green* e *Schwartz* mostrarono il fenomeno delle *anomalie*.

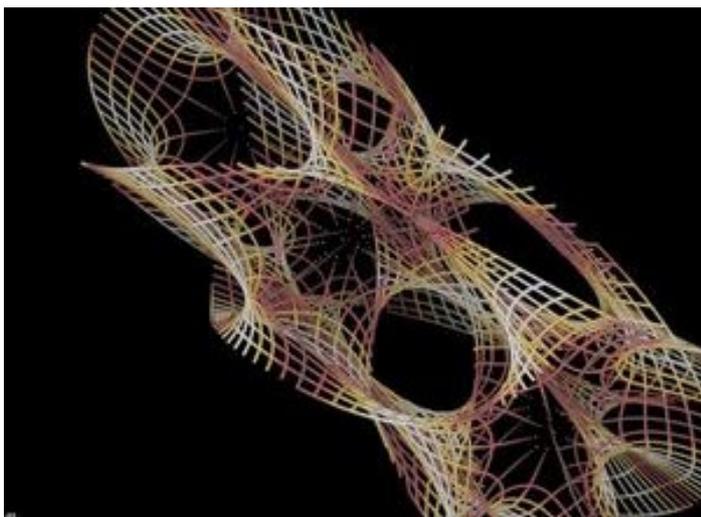


Figura 3 – Spazio di Calabi-Yau a sei dimensioni proiettato su un piano bidimensionale

Nella teoria quantistica dei campi inizialmente si pensava che le simmetrie della teoria classica delle particelle fossero sempre conservate; invece *Steven Adler*, *John Bell* e *Roman Jackiw* dimostrarono che ciò non è sempre vero e che la simmetria si rompe nei processi quantomeccanici che richiedono interazioni con particelle virtuali. Tale violazione di simmetria venne detta *anomala*.

Abbiamo già visto che una teoria delle forze che dia spiegazione dei fenomeni deve tener conto della simmetria interna: devono essere simmetrie esatte altrimenti non si elimina la polarizzazione indesiderata del bosone di gauge.

Per cui la simmetria associata ad una forza deve essere priva di anomalie, quindi, la somma algebrica di tutti gli effetti sulla simmetria deve essere nulla. Il Modello standard funziona grazie all'intervento di quark e leptoni ed il loro contributo è, difatti, a somma algebrica nulla.

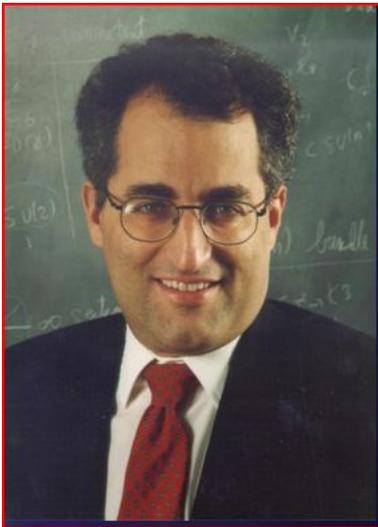


Figura 4 – Edward Witten

Nel 1983 *Luis-Alvarez-Gaume* e *Edward Witten* dimostrarono che le anomalie si verificavano non solo nella teoria quantistica ma anche nella teoria delle stringhe.

A seguire *Green e Schwarz* mostrarono che solo in una teoria delle stringhe a dieci dimensioni la somma algebrica dei contributi quantomeccanici è nulla.

Inoltre nel 1985 *David Gross, Jeff Harvey, Emil Martinec e Ryan Rohm* introdussero le stringhe eterotiche.

Il termine deriva dal greco heteròiosis = alterazione o ibrido.

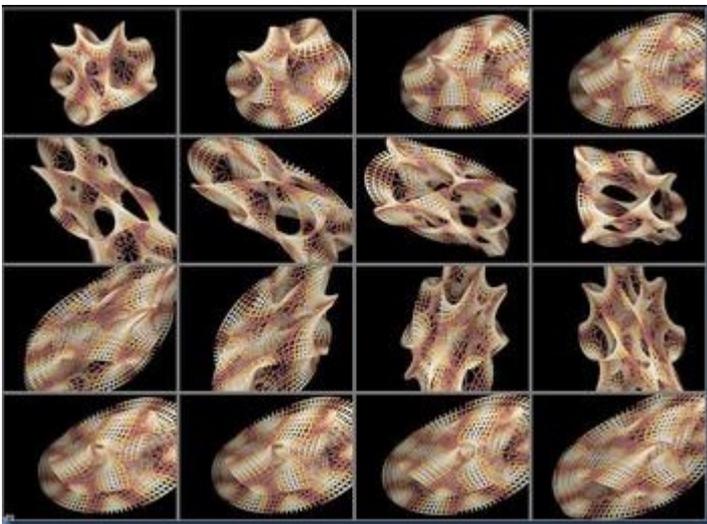


Figura 5 – Rotazioni varie dell'immagine precedente

Si tratta cioè di oggetti ibridi rispetto ai loro progenitori.

Nella teoria delle stringhe chiuse di partenza un modo di vibrazione o onda può avvenire in un verso o nell'altro.

Nella teoria delle stringhe eterotiche c'è un trattamento diverso tra le onde che viaggiano a sinistra e quelle che viaggiano a destra, il che riconduce alle particelle sinistrorse e destrorse del Modello standard. Questa nuova variante era interessante, perché permetteva una teoria delle forze con assenza di anomalie.

In altri termini la teoria delle superstringhe eterotiche poteva effettivamente considerarsi una estensione del Modello standard, la *TOE (Theory of Everything)*, capace di giustificare sia le forze che tutte le particelle trovate nel Modello standard.

A questo punto la domanda successiva era: “se tale modello prevede dieci dimensioni e nel mondo reale conosciamo solo 4 dimensioni, le altre 6 dimensioni extra dove sono?”. Sono arrotolate e di dimensioni non visibili era la risposta.



Figura 6 – Le sei dimensioni extra

Ma in una teoria delle stringhe eterotiche in dieci dimensioni, per poter trattare in modo diverso le particelle sinistrorse da quelle destrorse, non andavano bene le dimensioni arrotolate. Per cui la soluzione nel 1985 con *Philip Candelas, Gary Horowitz, Andy Strominger* fu quella di dire che si potevano considerare le dimensioni extra arrotolate purché compatte (le varietà di *Calabi-Yau*).

Le varietà di Calabi-Yau hanno permesso di determinare anche il numero di generazioni delle particelle elementari (purtroppo centinaia). Tuttavia sono in corso ancora studi per determinare quale varietà di Calabi-Yau è quella corretta, perché ce ne sono moltissime. E' comunque un argomento difficile, in cui occorre compiere ancora moltissimi passi.

Teoria delle stringhe applicata alle brane

Appena i fisici iniziarono a considerare la teoria delle stringhe anche per le brane, si scoprirono le cosiddette *teorie duali*, ovvero quelle teorie completamente diverse ma che producono gli stessi effetti fisici. Un esempio che vedremo nel seguito è l'equivalenza della teoria delle superstringhe eterotiche a dieci dimensioni con la supergravità a undici dimensioni (che contiene brane e non stringhe); vedremo anche la *Teoria M*.

Le brane sappiamo hanno delle dimensioni minori del bulk e che su esse sono intrappolate particelle e forze che si muovono solo nelle dimensioni delle brane. In altri termini le particelle e le forze intrappolate non possono sconfinare nel bulk.

Le brane però sono oggetti con una identità, sono reali. Possono essere allentate: in questo caso possono vibrare e hanno libertà di movimento; oppure possono essere tese: in questo caso si suppone che siano ferme. Inoltre le brane sono portatrici di cariche e capaci di interagire tramite forze: possono quindi influire sul comportamento delle stringhe e di altri oggetti.

Nel 1989 *Jin Dai, Rob Leigh, Joe Polchinski e Petr Horava*, lavorando alle equazioni della teoria delle stringhe scoprirono un particolare tipo di brana: la *D-brana*. Per semplificare abbiamo visto prima che le stringhe o sono chiuse o aperte. Se sono aperte le estremità devono stare da qualche parte: ebbene le estremità potevano stare solo nella modalità delle D-brane. Il bulk contiene più brane e, quindi, non è necessario che le stringhe siano sulla stessa brana. La teoria D-brane aveva individuato che tutte le stringhe aperte devono terminare su brane mentre la teoria delle stringhe diceva il numero delle dimensioni e quali proprietà devono avere queste brane.

Alcune brane si estendono in tre dimensioni (3-brane), altre in qualsiasi numero di dimensioni fino ad un massimo di 9. Le 3-brane sono quelle della nostra realtà e che dovremmo essere capaci di osservare.

Le brane possono essere diverse non solo per le dimensioni ma anche per carica, forma e *tensione* (che esamineremo nel seguito).

Inizialmente le brane non vennero introdotte, erano solo una curiosità e comunque pensate ferme e scarsamente interagenti; erano solo una complessità inutile.

Le brane, tra l'altro, erano contro-intuitive: sembravano cozzare col principio che le dimensioni sono equivalenti; mentre le brane richiedono che ci sia una distinzione tra le dimensioni: quelle lungo la brana sono diverse dalle dimensioni esterne alla brana. Le leggi della fisica, invece, sono uguali in tutte le direzioni, di conseguenza perché la teoria delle stringhe sarebbe dovuta essere diversa? Le brane non rispettano questa simmetria. Le dimensioni delle brane però sono confinate, come abbiamo visto all'inizio del lavoro.

Nel 1995 *Joe Polchinski* dimostrò che:

- le brane sono oggetti dinamici;
- fanno parte della teoria delle stringhe, spiegando quali tipi di D-brane sono presenti nella teoria delle superstringhe;

- sono dotate di cariche e quindi soggette a interazioni

La tensione delle brane li fa somigliare alla superficie di un tamburo: sono tese, sotto tensione; il che serve a riportarle nella posizione iniziale di riposo dopo l'interazione. Se la tensione di una brana fosse nulla, una piccola interazione produrrebbe un effetto enorme, perché la brana non offrirebbe resistenza. Se la tensione fosse infinita, al contrario, la brana sarebbe rigida e non dinamica. Invece essendoci una tensione finita allora possono muoversi e fluttuare, rispondere alle forze, come un oggetto dotato di cariche. Le brane hanno tensione non nulla e sono dotate di cariche e, per quest'ultime quindi, interagiscono anche tra loro, con oggetti dotati di cariche e con il campo gravitazionale.

Nello stesso periodo *Andy Strominger*, postulò l'esistenza delle *p-brane*. Andy mostrò che le *p-brane* si avvolgono in un a regione di spazio molto piccola e strettamente e che, inoltre, possono comportarsi come particelle. Joe Polkinski successivamente mostrò che le *p-brane* erano dimostrabili anche attraverso le *D-brane*, cioè esisteva un *concetto di dualità*.

Edward Witten nel 1995 ha proposto la *M-teoria*, che è una delle possibili TOE che si possano formulare. Witten non ha mai dato una spiegazione sul significato della "M"; scherzosamente per lui potrebbe essere tanto Membrana che Mistero. I fisici la chiamano "Teoria madre". In che consiste? A seconda del substrato geometrico, gli spazi di cui abbiamo parlato prima, la M-teoria è associata a differenti teorie di superstringa (in differenti substrati geometrici) e questi limiti sono in correlazione tra loro in base al principio della dualità. Due teorie fisiche si definiscono duali se hanno effetti fisici identici dopo che sono state applicate determinate trasformazioni matematiche.

Ecco in tabella le principali caratteristiche delle teorie di stringa conosciute.

Tipo	Dimensioni	Dettagli
Bosonica	26	Solo bosoni, nessun fermione, quindi solo forze, niente materia, sia stringhe chiuse che aperte; incongruenza maggiore: una particella con massa immaginaria, chiamata tachione
I	10	Supersimmetria tra forze e materia, con stringhe sia aperte che chiuse, nessun tachione, gruppo simmetrico SO(32)
IIA	10	Supersimmetria tra forze e materia, solo stringhe chiuse, nessun tachione, fermioni privi di massa con spin in entrambe le direzioni (non-chirali)
IIB	10	Supersimmetria tra forze e materia, solo stringhe chiuse, nessun tachione, fermioni privi di massa con spin in un'unica direzione (chirali)
HO	10	Supersimmetria tra forze e materia, solo stringhe chiuse, eterotiche, cioè le stringhe che si muovono verso destra differiscono da quelle che si muovono a sinistra, nessun tachione, gruppo simmetrico SO(32)
HE	10	Supersimmetria tra forze e materia, solo stringhe chiuse, eterotiche, cioè le stringhe che si muovono verso destra differiscono da quelle che si muovono a sinistra, nessun tachione, gruppo simmetrico E8×E8

Tabella 1 – Principali caratteristiche delle teorie di stringhe conosciute

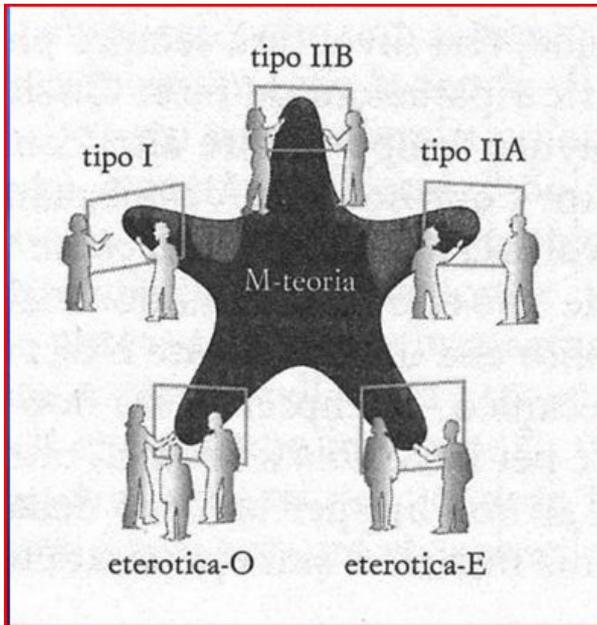


Figura 7 – Schema unificato delle cinque teorie

Una curiosità: se si guarda la figura precedente a stella si hanno 5 vertici o punti, se li si dispone con una configurazione uno sopra e uno sotto, un'altra configurazione analoga accanto e si mette un punto in mezzo tra le due configurazioni, esce una "M". Mah!

Da cosa è nata la M-teoria? Se vogliamo capire la dualità dobbiamo comprendere come i fisici fanno i calcoli con la teoria delle stringhe. In pratica i fisici dispongono di due parametri: la tensione delle stringhe e l'*accoppiamento di stringa*. Il secondo non è noto. Se fosse noto basterebbe un solo parametro. L'*accoppiamento di stringa* serve a comprendere se per le stringhe esiste un *accoppiamento stretto* o un *accoppiamento lasco*.

All'inizio con l'*accoppiamento stretto* e per una geometria a dieci dimensioni si arrivava a calcoli troppo complicati; per cui l'*accoppiamento lasco*, almeno come calcoli, era più semplice, perché se c'è un *accoppiamento lasco* l'interazione è piccola e se applicata ad un sistema dinamico e risolvibile allora permette di usare un metodo che i fisici chiamano "*metodo delle perturbazioni*" (una sorta di principio di sovrapposizione degli effetti).

Nel caso di accoppiamenti stretti e geometria a dieci dimensioni sarebbero in teoria possibili i seguenti risultati:

- non c'è soluzione
- la soluzione qualitativamente si avvicina a quella dell'*accoppiamento lasco*
- la soluzione non si avvicina nemmeno qualitativamente a quella dell'*accoppiamento lasco* (ad esempio in quella IIA)

Edward Witten nel marzo del 1995, nel convegno *Strings '95*, dimostrò che a basse energie *la teoria delle superstringhe a dieci dimensioni con accoppiamento stretto è equivalente alla teoria della supergravità a undici dimensioni con accoppiamento lasco*. Questo era una dualità di enorme importanza perché passando alla teoria duale a maggior dimensioni ma ad accoppiamento lasco era possibile l'utilizzo del "*metodo delle perturbazioni*".

La teoria delle superstringhe a undici dimensioni era la M-teoria. Il rispecchiamento delle teorie, a causa di tali dualità, non è del tutto chiaro ancora: molto probabilmente riguarda sempre la teoria dei gruppi e le simmetrie e qui i matematici hanno di che sbizzarrirsi.

In ogni caso già nel 1995 si doveva capire perché si potesse passare dalla teoria delle superstringhe a dieci dimensioni alla supergravità a undici dimensioni. Soprattutto c'era una perplessità: la teoria delle superstringhe a dieci dimensioni tratta stringhe, la supergravità a undici dimensioni non contiene stringhe. Come era possibile?

Erano in gioco le brane. Come? Se la teoria della supergravità non contiene stringhe allora contiene almeno una 2-brane, una brana a due dimensioni, di cui una estesa e l'altra arrotolata e stretta per cui apparentemente trascurabile, al punto tale che sembra di avere a che fare con dieci dimensioni. Bastava questo per la dualità? Witten nel convegno Strings '95 dimostrò non solo che era sufficiente, ma che la dualità era presente non solo tra le teorie ma anche tra tutte le singole parti e particelle che hanno un duale, anche le particelle con energia tali da sondare dimensioni molto più piccole della dimensione extra arrotolata.

Come era possibile che teorie con numero di dimensioni diverse erano la stessa cosa? La dualità potrebbe essere vera se la teoria delle superstringhe avesse bisogno di un parametro aggiuntivo, di una dimensione in più.

La *chiave di volta della faccenda* è che nella teoria delle superstringhe si riesce a individuare particelle nuove e speciali se si introducono il valore di carica e di quantità di moto in nove dimensioni; mentre nella teoria della supergravità si esprime solo la quantità di moto su dieci dimensioni. Le stringhe senza carica, cioè, non hanno oggetti corrispondenti nella teoria a undici dimensioni. Le stringhe con carica hanno invece oggetti corrispondenti.

Viceversa il compagno duale di una particella nella teoria a undici dimensioni è una brana nella teoria a dieci dimensioni: brane puntiformi dotate di carica e dette "*Do-brane*".

In pratica la quantità di moto in una teoria a undici dimensioni corrisponde a una carica in una teoria a dieci dimensioni e viceversa. Tuttavia le dimensioni sono quelle direzioni in cui si esplica la quantità di moto; allora se una quantità di moto è sostituibile da una carica e viceversa è poco definito il numero delle dimensioni e *questo giustifica l'uso del parametro di accoppiamento stretto o lasco*.

Dal convegno di Springs '95 moltissimi fisici sono ormai convinti che è la M-teoria la teoria Madre, anche delle stringhe.

Particelle, stringhe e brane

La teoria delle stringhe confina particelle e forze sulle brane. Se ci fosse una sola D-brana in un universo a più dimensioni, poiché gli estremi delle le stringhe aperte devono iniziare e finire su delle brane, allora tutte le stringhe inizierebbero e finirebbero sull'unica D-brana disponibile. Non è necessario, poi, che gli estremi siano fissati sulla brana in particolari punti. Le particelle, ovviamente, corrispondono ai modi di vibrare delle stringhe aperte e poiché le stringhe aperte aderiscono alla brana le particelle sono confinate sulla brana.

Una di queste particelle sulla brana è un bosone di gauge, in grado di trasmettere una forza. Sappiamo che è un bosone di gauge perché ha spin 1 e interagisce come un bosone. Di solito l'estremo di una stringa, confinato su una brana, si comporta come una particella carica.

Ora la presenza di queste forze vincolate alla brana e delle particelle cariche ci dice che una D-brana si presenta “precaricata” con un corredo completo di cariche e forze agenti sulle particelle.

Che succede se abbiamo 2 D-brane? Adesso esistono più insiemi di forze e di particelle. In questo caso le stringhe che sono con un estremo su una D-brana e l'altro estremo sulla rimanente D-brana daranno luogo a nuove particelle originate dai modi di vibrazione delle stringhe e ulteriori forze. Daranno ad esempio luogo ad un nuovo bosone di gauge.

Inoltre se tra una coppia di D-brane è interposto dello spazio le particelle associate alle stringhe tese tra le due D-brane saranno pesanti. In particolare la massa tende ad aumentare all'aumentare di tale distanza.

La massa è come l'energia caricata da una molla soggetta a deformazione per estensione: più si estende e più energia accumula. Allo stesso modo una particella generata dal modo di vibrazione di una stringa estesa tra due D-brane avrà una massa che aumenta all'aumentare della distanza: ad esempio un bosone di gauge a massa non nulla.

Se la molla è a riposo abbiamo energia nulla, per cui se due D-brane coincidono o sono a distanza zero, le estremità della stringa sono sulla stessa D-brana e la particella è a massa nulla: un bosone di gauge a massa nulla.

Ovviamente potremmo supporre anche molte D-brane sovrapposte e troveremo nuove particelle, corrispondenti ai modi di vibrare di stringhe aperte etc. Questo per dire che ci troveremo sempre di fronte a un corredo di particelle nuove e di forze.

Ovviamente esistono anche particelle e forze su brane differenti tali da rappresentare gruppi indipendenti. Ora particelle confinate su brane separate non interagiscono direttamente ovvero *l'interazione è solo locale alla brana*.

Le particelle su brane differenti potrebbero interagire tra loro solo in un caso, se nel bulk esistessero particelle libere di muoversi e tali da andare da una brana all'altra. Vedremo che una particella di questo tipo è ipotizzata che sia il gravitone. Finora mai individuato: perché forse viaggia nel bulk mentre noi siamo confinati su una brana, dovremmo però vederne le interazioni o una sua proiezione su un numero di dimensioni minori ...

La gravità

La gravità non è confinata su una brana. I bosoni di gauge e i fermioni, vincolati sulle brane, traggono origine dai modi di vibrazione delle stringhe chiuse. Il gravitone, invece, è generato dai modi di vibrazione delle stringhe aperte. La gravità, quindi, è in grado di viaggiare nel bulk multi-dimensionale.

Modelli di mondi di brane

La teoria delle stringhe non ci dice se le brane esistono, né quante siano; in ogni caso le brane sono un elemento essenziale della teoria stessa altrimenti essa non sarebbe possibile. In altri termini sono elementi previsti; ma la domanda successiva da porsi è: esistono realmente e quali sono le conseguenze di esse sul mondo?

Se particelle e le forze sono confinate sulle brane, lo siamo anche noi, che siamo costituiti a nostra volta di particelle. Però visto che le brane possono essere molte e su ognuna sono presenti particelle nuove e forze, l'universo che conosciamo è solo una parte. In particolare si può definire “*mondo di brane*” tutti i modi possibili in cui l'universo può includere le brane senza preferirne uno in

particolare. Inoltre in mondi diversi non sappiamo se le leggi fisiche siano le stesse di quelle che conosciamo.

Il primo modello noto è il *mondo di brane HW*, proposto da Horava e Witten. In particolare si tratta di due brane parallele, ognuna delle quali con nove dimensioni spaziali (rappresentate come bidimensionali) e separate da un'undicesima dimensione spaziotempo; mentre il bulk comprende tutte le undici dimensioni.

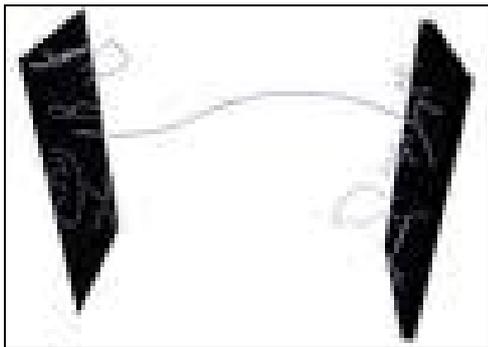


Figura 8 – Due brane parallele con 5 stringhe

Ognuno delle due brane contiene un universo diverso di particelle e di brane. Le forze sulle due brane sono le stesse di quelle delle stringhe eterotiche viste prima. Lungo queste stringhe le oscillazioni interagiscono tra loro in modo diverso, viaggiando a destra o a sinistra: così una metà delle forze è confinato su una brana e l'altra sulla brana opposta.

Ora ci sono forze e particelle a sufficienza su una brana tali da comprendere tutte quelle note del Modello standard; mentre quelle non ancora osservate potrebbero trovarsi sull'altra brana o addirittura nel bulk.

Non solo ma il mondo di brane HW, non contiene solo stringhe ma esso stesso è una stringa eterotica, con un accoppiamento di stringa forte. Anche questa è una dualità: una teoria di undici dimensioni con due brane di confine equivalente a una stringa eterotica a dieci dimensioni. Se il mondo di brane HW è reale, allora almeno sei dimensioni sfuggono alle nostre osservazioni: Horava e Witten ipotizzarono che le sei dimensioni sono arrotolate in una geometria di Calabi-Yau e di dimensione estremamente piccole.

L'isolamento delle particelle

Le particelle trovandosi su brane differenti sono sostanzialmente isolate e sicuramente le dimensioni extra possono influire sulle proprietà delle particelle. Inoltre il famoso "*principio dell'anarchia*" secondo cui le particelle subiscono tutte le interazioni possibili, non è detto che abbia luogo se sono su brane distinte. Difatti le particelle distanti non possono interagire.

Questo porta ad alcune considerazioni e spiegazioni: in un modello in cui le particelle che danno luogo alla rottura della supersimmetria come quelle del Modello standard, è possibile che la rottura di simmetria non è accompagnata da trasformazione dei sapori delle particelle. Questo ad esempio è un esperimento a cui fisici pensano di poter arrivare a verificare. Se ciò fosse vero si capirebbe nel caso di rottura di simmetria rispetto al sapore il perché della differenza di massa.

Particelle di Kaluza-Klein (KK)

Se una particella si sposta nel bulk dovremmo comunque vederla nelle dimensioni a noi visibili ovvero le 4 dimensioni spaziotempo a noi familiari. Non siamo capaci di vederla nelle dimensioni extra ma nelle nostre dimensioni solite. Le particelle extradimensionali, che si muovono nel bulk e che noi ne vediamo solo la traccia nelle dimensioni a noi note, sono le *particelle KK* (Kaluza-Klein).

Per poter descrivere completamente queste particelle KK pluridimensionali, devono essere portatrici di una quantità di moto extradimensionale. Da quanto abbiamo appreso precedentemente

se in un sistema a molte dimensioni abbiamo una quantità di moto, quando passiamo ad un sistema a minor dimensioni la quantità di moto diventa un'altra cosa. Poiché c'è una relazione tra massa e quantità di moto, nel mondo a minor dimensioni apparirebbe come una massa. In altri termini le particelle KK apparirebbero come particelle pesanti, con le stesse cariche delle particelle ora note. Potrebbe esistere un quark pluridimensionale o un elettrone pluridimensionale che ha particelle KK apparentate alla stessa carica negativa.

Le particelle KK sono, quindi, la manifestazione nello spaziotempo di particelle pluridimensionali.

Le procedure usate dai fisici per trovare i valori consentiti delle quantità di moto delle particelle KK in un universo a dimensioni extra arrotolate è simile a quello delle onde o quelle delle orbite quantizzate dell'atomo di Bohr in meccanica quantistica: prima si determinano le onde ammissibili, poi si associa la quantità di moto alla lunghezza d'onda. Dalla quantità di moto si risale alle masse delle particelle KK.

Tra le onde ammissibili ci sono anche quelle costanti o piatte che non oscillano affatto (a basse energie) e si producono particelle KK ma non tali da poterle differenziare da particelle normali. Le particelle KK più leggere sono associate ad un'onda extradimensionale piatta; mentre quelle più pesanti ad un'onda extradimensionale con quantità di moto non nulla ad energia maggiore. Queste sarebbero osservabili e testimonierebbero circa le dimensioni extra.

Una particella leggera ha una funzione di probabilità associata ad una lunghezza d'onda maggiore e la massima lunghezza d'onda può corrispondere all'oscillazione lungo il perimetro della dimensione extra.

Un'altra caratteristica di queste particelle KK leggere ma con quantità di moto non nulla è che la loro quantità di moto diminuisce all'aumentare della dimensione extra. In ogni caso se le dimensioni extra esistessero, la loro presenza potrebbe essere rilevata anche dalle particelle KK ad alta quantità di moto, nei collisori, che hanno una onda di probabilità tale da compiere multipli n di oscillazioni del perimetro della dimensione extra. Ovviamente in tal caso queste particelle KK hanno una massa multipla n volte di quella delle particelle KK leggere.

In conclusione le particelle KK più leggere sono molto simili a quelle del mondo quadridimensionale e non rivelerebbero le dimensioni extra; quelle pesanti, invece, metterebbero a nudo i segreti del mondo pluridimensionale.

Come vedete è un mondo affascinante ancora tutto da perlustrare.

La scala di dimensioni

Fino a qualche tempo fa la scala delle dimensioni che si ipotizzava per le dimensioni extra era la scala di Planck (10^{-33} cm); adesso sta emergendo la possibilità che queste dimensioni extra siano collocate ad una dimensione maggiore ma pur sempre molto piccola per il mondo in cui siamo abituati a vivere (10^{-17} cm).

Grandi dimensioni extra e la gravità: la teoria ADD

Le grandi dimensioni extra, secondo *Arkani Hamed, Dimopoulos* e *Gia Dvali* nel seminario di Savas del 1998, potrebbero spiegare la debole interazione gravitazionale. La teoria battezzata ADD, dalle iniziali degli autori, consiste nel fatto che le dimensioni extra potrebbero essere tali da distribuire la forza e le sue linee di forza in modo che l'intensità della gravità potrebbe ridursi ed essere più debole delle stime che si fanno trascurando le dimensioni extra. Ciò avverrebbe se le

dimensioni extra non fossero piccole. Il modello ADD non spiega due cose: perché le dimensioni extra dovrebbero essere grandi, né il problema della gerarchia.

Il modello di brana ADD è quindi costituito da una sola brana che si estende in una di esse (4 dimensioni) e ha le dimensioni extra arrotolate: immaginiamo una sorta di cilindro stretto e molto lungo.

I tre fisici si posero l'obiettivo di rispondere alla domanda: "Quanto grandi devono essere le dimensioni extra se le particelle del Modello standard sono confinate su una brana e l'unica forza nel bulk pluridimensionale è la gravità, il tutto senza contraddire i risultati sperimentali?". Ebbene sembrava che la dimensione di un millimetro fosse la risposta giusta; ovviamente ciò va preso con cautela: però dimostra che rispetto alla scala di Planck le dimensioni extra potrebbero essere ben maggiori anche se non facilmente visibili.

Soluzione al problema della gerarchia

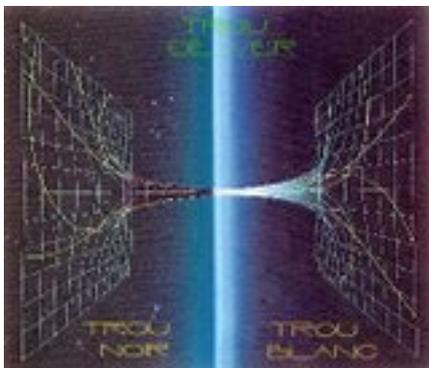
Ricorderemo che in [8] abbiamo parlato del problema della gerarchia: perché la massa della scala debole è così piccola nonostante i contributi virtuali alla massa della particella di Higgs?

Fin quando i fisici non consideravano le dimensioni extra, tentavano solo di migliorare il Modello standard. Col senno del poi e con il "tarlo delle dimensioni extra in testa" si cominciò a ragionare diversamente.

Secondo i teorici ADD il tentativo di migliorare il Modello standard era errato: iniziava a farsi avanti il sospetto che si era interpretata male la gravità. Essi ipotizzavano che la scala di massa che determina la gravità non fosse quella di Planck ma molto più piccola, dell'ordine di qualche TeV. (ricordatevi che parlare di massa o energia è lo stesso). Inoltre giustificarono che la gravità era debole a causa della dimensione enorme delle dimensioni extra o meglio appariva debole perché rapportata ad uno spazio pluridimensionale molto esteso, di cui vediamo solo le dimensioni della brana in cui siamo, veniva molto attenuata.

Geometrie Curve

Le ultime implicazioni che i fisici attuali stanno studiando è che lo spaziotempo può curvarsi in un modo spettacolare per l'influenza delle energie nelle brane e nei bulk, anche quando la brana è piatta.



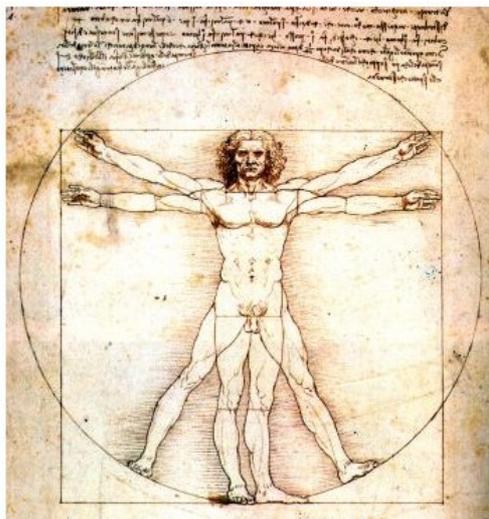
Il modello che prendono in considerazione è a due brane: una di gravità e l'altra una brana debole che sono posizionate all'estremo di una quinta dimensione di grandezza però finita. L'energia nel bulk e nelle brane influisce sullo spazio tempo.

Il problema della gerarchia sarebbe risolto introducendo un'altra dimensione extra, non molto estesa ma molto ritorta. L'intensità della gravità è forte sulla brana di gravità e debole sull'altra brana.

Gli oggetti confinati sulla brana di gravità sarebbero molto pesanti, quelli sull'altra no. Con un modello del genere tutte le forze si possono unificare e si può risolvere il problema della gerarchia solo se la particella di Higgs è sulla brana debole.

Conclusioni

Molte delle teorie viste, sia in [8] che in questo articolo, attendono riscontri sperimentali. Certamente la teoria delle stringhe e delle brane sembra la più spettacolare e promettente tra tutte quelle finora pensate. Tuttavia il cammino della Scienza è ancora molto lungo e faticoso da farsi e ormai siamo abituati anche a spettacolari cambiamenti di concezioni. La Natura tuttavia sa offrire saggiamente i suoi frutti, ben mascherando i suoi mezzi e le sue Leggi eterne.



Riferimenti

- [1] Rosario Turco, Maria Colonnese - Congettura di Yang e Mills o del “gap di massa”
- [2] Lisa Randall - Passaggi curvi – I misteri delle dimensioni nascoste dell’universo
- [3] Leon Lederman con Dick Teresi – La particella di Dio – Se l’universo è la domanda qual è la risposta?
- [4] Albert Einstein, Leopold Infeld – L’evoluzione della Fisica
- [4] Mikio Kaku – Mondi Paralleli
- [6] FritJof Capra – Il Tao della fisica - Adelphi
- [7] RaminusFalcon, FilippoQ - Geometrie non euclidee - wikibook
- [8] Rosario Turco, Maria Colonnese - Le dimensioni extra nascoste, la particella di Higgs ed il vuoto quantomeccanico, supersimmetria e teoria delle stringhe

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.